

# Formación de surcos sedimentarios por cataratas submarinas en el interior del cañón de Cap de Creus

## *Dense shelf water cascades and sedimentary furrows formation in the Cap de Creus Canyon*

P. Puig<sup>1</sup>, A. Palanques<sup>1</sup>, D.L. Orange<sup>2,3</sup>, G. Lastras<sup>4</sup> y M. Canals<sup>4</sup>

1 Institut de Ciències del Mar, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49, E-08003 Barcelona, Spain

2 Department of Earth Sciences, UCSC, Santa Cruz, CA 95064, USA

3 AOA Geophysics Inc., 7532 Sandholdt Rd., Suite 6, Moss Landing, CA 94039, USA

4 CRG Marine Geosciences; Dept. Stratigraphy, Paleontology and Marine Geosciences; Faculty of Geology; University of Barcelona; Campus de Pedralbes; E-08028 Barcelona; Spain

**Resumen:** De septiembre de 2004 a septiembre de 2005 se fondearon varios anclajes en el interior del cañón submarino de Cap de Creus para investigar los procesos de transporte de sedimento asociados a las cataratas submarinas de agua densa del Golfo de León. Durante el invierno de 2005 este fenómeno oceanográfico fue excepcionalmente intenso, afectando de forma casi continuada la cabecera del cañón submarino desde finales de enero hasta principios de abril, manteniendo temperaturas bajas, concentraciones de sedimento en suspensión altas y corrientes elevadas (procedentes preferentemente del flanco sur del cañón). El análisis de las partículas atrapadas por una trampa de sedimento fondeada a 30 m sobre el lecho marino evidenció que estas cataratas submarinas son capaces de transportar sedimentos de tamaño grueso en suspensión (hasta un 65 % de fracción arena), dotándose de una gran capacidad erosiva y de generación de formas de fondo. La orientación de un campo de surcos sedimentarios erosivos identificado recientemente en el interior del cañón coincide claramente con las direcciones preferentes de las corrientes de mayor intensidad durante los eventos de cataratas submarinas. Este hecho indica una relación causa-efecto entre los procesos contemporáneos de transporte de sedimento asociados a este proceso oceanográfico y la formación y mantenimiento de los surcos sedimentarios en el interior del cañón submarino de Cap de Creus.

**Palabras clave:** cataratas submarinas, surcos sedimentarios, cañón submarino.

**Abstract:** To investigate the processes by which sediment is transported through a submarine canyon incised in a continental margin affected by recurrent dense shelf water cascading events, several instrumented moorings were deployed in the Cap de Creus Canyon from September 2004 to September 2005. Cascading was exceptionally intense during winter 2004-05 and from late January to early April, this process almost continuously affected the entire upper canyon section and maintained cold temperatures, high suspended sediment concentrations and down-canyon steady currents >40 cm/s, preferentially directed to ENE (i.e. coming from the southern canyon wall). Grain size analyses of the particles caught by a near-bottom sediment trap show that dense shelf water cascades are able to transport coarse sediments (up to 65% sand) in suspension, which have the potential to abrade the seafloor and generate erosive bed forms. The orientation of a large field of "wide" (i.e. widths about 1/2 spacing indicative of erosive formation) sedimentary furrows recently observed in the Cap de Creus Canyon clearly coincides with the preferential direction of highest velocities measured by the moored current meters, indicating a causative relationship between contemporary dense shelf water cascades and furrows formation.

**Key words:** Dense shelf water cascade, sedimentary furrows, submarine canyon.

## INTRODUCCIÓN

El hundimiento invernal de aguas densas costeras en forma de catarata constituye un proceso oceanográfico conocido desde hace tiempo en determinadas regiones del océano global. El Golfo de León, es una de las tres áreas del Mar Mediterráneo donde este fenómeno se ha observado regularmente (Durrieu de Madron *et al.*, 2005). Combinaciones específicas de caudales bajos de los ríos que desembocan en el Golfo de León, junto a una alta

intensidad y larga duración de vientos de componente norte y de temperaturas del aire bajas, llegan a enfriar hasta tal punto las aguas superficiales de la plataforma continental que el aumento subsiguiente de su densidad provoca su hundimiento masivo. En estas condiciones se forman auténticas cataratas submarinas que desbordan la plataforma continental y se desparraman talud abajo, preferentemente a través de los cañones submarinos que caracterizan este margen. Las condiciones meteorológicas particulares de cada invierno determinan las características termohalinas de

estas cataratas, y por consiguiente su densidad, condicionando así la intensidad del hundimiento y la profundidad máxima alcanzada.

En inviernos excepcionalmente secos, fríos y ventosos, como fue el caso de los de 1998-99 y 2004-05, este fenómeno es particularmente intenso, y grandes cantidades de agua y sedimento son transportadas rápidamente hasta miles de metros de profundidad, hacia el fondo de la cuenca del Mediterráneo noroccidental, llegándose a multiplicar por 5 los flujos de partículas registrados en el interior de los cañones submarinos del Golfo de León (Heussner *et al.*, 2006; Canals *et al.*, 2006). La circulación general en sentido ciclónico y la estrecha plataforma continental en el sector oriental del Golfo de León, provocan que la exportación de agua y sedimento asociados a la formación de estas cataratas submarinas tenga lugar preferentemente a través del cañón submarino de Cap de Creus (Palanques *et al.*, 2006).

La realización de una batimetría multihaz de alta resolución en la cabecera del cañón submarino de Cap de Creus puso de manifiesto la presencia de un amplio campo de grandes surcos sedimentarios (*sedimentary furrows*) en su interior, el cual posteriormente fue cartografiado al completo mediante el uso de un sonar de barrido lateral de gran profundidad (ver Lastras *et al.*, 2007). Los surcos sedimentarios son un tipo de forma de fondo generalmente identificada en zonas con corrientes submarinas persistentes o fuertes que afectan a sustratos de fangos cohesivos (ver Flood, 1983). La relación causa-efecto entre este campo de surcos sedimentarios y la presencia de cataratas submarinas en el cañón submarino de Cap de Creus fue destacada en Canals *et al.* (2006). En esta nueva contribución se presentan los parámetros más representativos de las series temporales registradas por los instrumentos fondeados a lo largo del eje del cañón submarino de Cap de Creus durante el invierno de 2004-05 y se discuten nuevos aspectos hidrodinámicos que refuerzan la relación causa-efecto entre el campo de surcos sedimentarios observados y las cataratas submarinas registradas en dicho cañón.

## MÉTODOS

La batimetría de alta resolución de la cabecera del cañón submarino de Cap de Creus fue adquirida en julio de 2004 por Fugro Engineers B.V., AOA Geophysics y la Universidad de Barcelona mediante una sonda multihaz Kongsberg Simrad EM300 de 30 kHz instalada en el *M/V Geo Prospector*. Los datos batimétricos se procesaron con el software Neptune de Kongsberg y se promediaron a un tamaño de celda ligeramente superior al inter-espaciado entre haces, llegando a generar una malla de 10x10 m.

Las sonografías de alta resolución a lo largo del eje del cañón submarino de Cap de Creus se obtuvieron en agosto de 2004 a bordo del *R/V Professor Logachev* mediante un sonar de barrido lateral MAK-1M de 30

kHz. Este instrumento se arrastró a unos 100 m del fondo marino y a una velocidad de 2,5 nudos, desde una profundidad de 600 m hacia aguas más profundas, siguiendo la dirección del eje del cañón. Las sonografías obtenidas proporcionaron una cobertura lateral de hasta 2 km, con una resolución variable de 7 a 1 m a través y a lo largo del curso de navegación, respectivamente (ver Lastras *et al.*, 2007, para más detalles).

La Figura 1 ilustra las áreas cubiertas por la batimetría de multihaz en la cabecera del cañón y por las sonografías de alta resolución a lo largo de su eje. La integración de ambos datos proporcionó una cobertura casi total del campo de surcos sedimentarios del interior del cañón submarino de Cap de Creus.

Durante el proyecto EuroSTRATAFORM, de septiembre de 2004 a septiembre de 2005 y a lo largo de tres fondeos sucesivos, se mantuvieron tres anclajes oceanográficos a lo largo del eje del cañón, a 200, 500 y 750 m de profundidad (Fig. 1). Cada uno de estos anclajes estaba equipado con un correntímetro Aandera RCM9 con sensores de temperatura, conductividad, presión y turbidez, situado a 5 m sobre el fondo marino.

El anclaje situado a 500 m de profundidad estaba equipado además con una trampa de sedimento secuencial Technicap PPS3 con 12 recipientes colectores, situada a 30 m sobre el fondo marino. El intervalo de muestreo de los correntímetros fue de 20 minutos y las muestras de la trampa de sedimento integraron los flujos verticales acumulados entre 7 y 10 días, en función del periodo de muestreo.

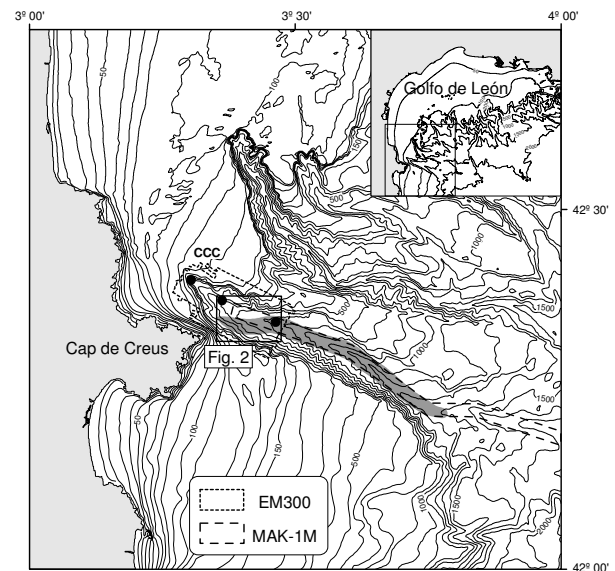


FIGURA 1. Batimetría del sector oriental del Golfo de León (malla de 200x200 m) donde se muestra la localización del cañón de Cap de Creus (CCC) y las áreas cubiertas por la batimetría de multihaz con la sonda EM300 (límite punteado) y por las sonografías de alta resolución del MAK-1M (límite rallado). Los puntos representan las posiciones de los tres anclajes fondeados a lo largo del eje del cañón a 200, 500 y 750 m de profundidad. La zona de color gris representa el área del cañón con presencia de surcos sedimentarios.

## RESULTADOS

Los surcos sedimentarios en la cabecera del cañón submarino de Cap de Creus empiezan a desarrollarse a una profundidad de unos 300 m y se encuentran localizados, en su mayoría, en el flanco sur (Fig. 2). Estos surcos muestran una orientación predominante de ONO a ESE, ligeramente oblicua al eje del cañón, y tienen decenas de kilómetros de longitud. Los surcos están excavados varios metros en fangos cohesivos, mostrando perfiles más abruptos cerca del eje del cañón. Tienen una anchura de 30-50 m y una longitud de onda media de 100 m (Fig. 2), pudiéndose catalogar por tanto como surcos de tipo 1C (i.e. separados aproximadamente el doble de su anchura; Flood, 1983).

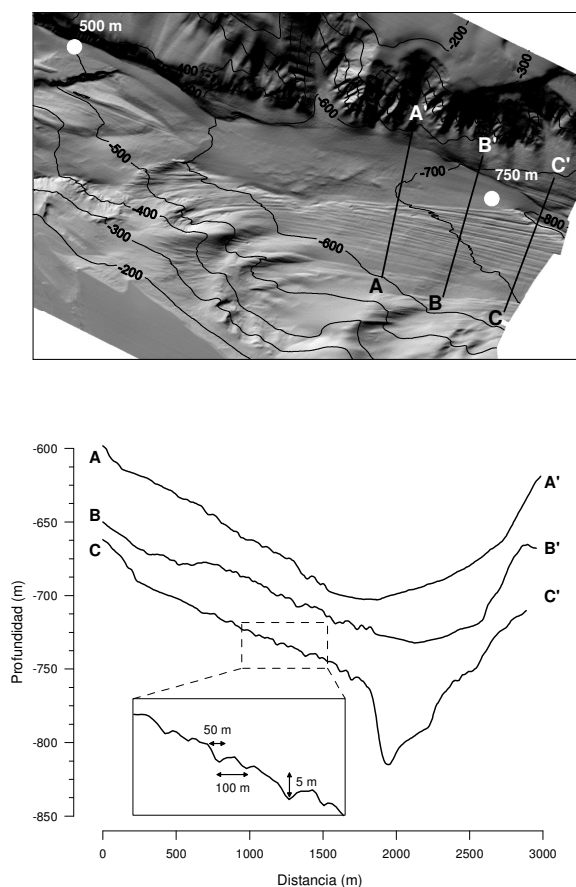


FIGURA 2. Relieve sombreado y batimetría detallada de la cabecera del cañón submarino de Cap de Creus obtenida con la sonda de multihaz EM300 (malla de 10x10 m) donde se puede observar la región en la que los surcos sedimentarios empiezan a desarrollarse, así como la localización de los anclajes oceanográficos situados a 500 y 750 m de profundidad (ver en Figura 1 la localización del sector del cañón ilustrada). En la parte inferior de la figura se muestran tres secciones topográficas a través del campo de surcos sedimentarios donde se observa la relación entre la longitud de onda y la anchura de los surcos, así como su profundidad.

El campo de surcos sedimentarios confluye con el eje del cañón a una profundidad aproximada de 750 m, donde se situó el anclaje oceanográfico más profundo. También se observa un conjunto de surcos sedimentarios menos desarrollados al sur del anclaje situado a 500 m de profundidad, los cuales muestran una orientación más paralela al eje del cañón.

Los anclajes oceanográficos fondeados en la cabecera del cañón de Cap de Creus registraron con gran detalle el transporte de aguas costeras densas cerca del lecho del cañón, en forma de catarata submarina, durante el invierno de 2005. Estos eventos son fácilmente reconocibles en las series temporales ya que se caracterizan por fuertes descensos de la temperatura asociados a aumentos de la velocidad de la corriente. Ese invierno fue anormalmente seco, ventoso y frío, lo cual favoreció un aumento de la densidad del agua costera y la intensificación del proceso de formación de cataratas submarinas. Estas empezaron a detectarse a finales de diciembre de 2004, aunque los primeros pulsos se registraron solo a 200 m de profundidad, y no fue hasta finales de enero de 2005 que llegaron a 500 y 750 m de profundidad. Desde esas fechas hasta principios de abril de 2005, la catarata submarina en el cañón de Cap de Creus fluyó casi de forma continua, manteniendo temperaturas bajas y velocidades elevadas, entre 40 y 80 cm/s (Fig. 3).

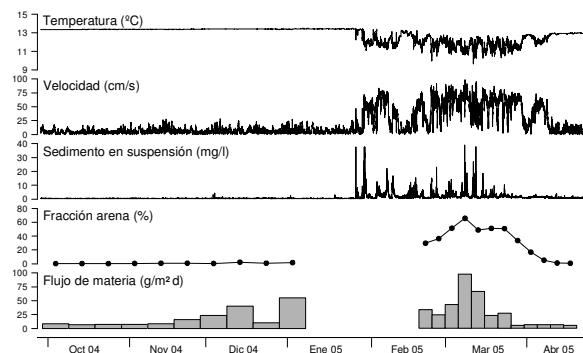


FIGURA 3. Registros de temperatura, velocidad de la corriente y concentración de sedimento en suspensión medidas por el correntímetro y evolución temporal de la fracción arena y el flujo de materia de las muestras recolectadas por la trampa de sedimento; ambos instrumentos fondeados a 500 m de profundidad a 5 y 30 m del fondo, respectivamente.

Estas cataratas submarinas llevan consigo concentraciones de sedimento en suspensión altas, tanto de partículas procedentes de la plataforma continental como de la resuspensión del sedimento del lecho del cañón por la acción de las fuertes corrientes asociadas a este proceso. Las concentraciones máximas registradas excedieron los 40 mg/l (i.e., límite de detección del sensor de turbidez), superando en numerosas ocasiones los 10 mg/l (Fig. 3).

El análisis granulométrico del material recolectado por la trampa de sedimento demostró que antes del periodo en el que se produjeron las cataratas submarinas, las partículas de sedimento tenían menos de un 2% de contenido en arena a 30 m del fondo. Sin embargo, durante los eventos de cataratas estas estaban compuestas por más de un 30% de arena, llegando a un máximo de un 65% a principios de marzo, coincidiendo con el pico de flujo de materia. A mediados de abril, una vez reestablecidas las condiciones hidrodinámicas, el contenido de arena pasó a ser de nuevo inferior a un 1% (Fig. 3).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio conjunto de las series temporales de los instrumentos fondeados en el cañón de Cap de Creus demuestra que las cataratas submarinas que se registran en su interior pueden llegar más allá de los 750 m de profundidad, generando velocidades superiores a 80 cm/s y transportando arenas en suspensión durante largos periodos de tiempo. El análisis comparativo de la hidrodinámica a 500 y 750 m de profundidad y de los surcos sedimentarios situados en las cercanías de los anclajes indica que las alineaciones de los surcos coinciden claramente con las direcciones de las corrientes más elevadas y persistentes (Fig. 4). Este hecho demuestra que las fuertes corrientes inducidas por las cataratas submarinas determinan en la actualidad la disposición y orientación del campo de surcos sedimentarios.

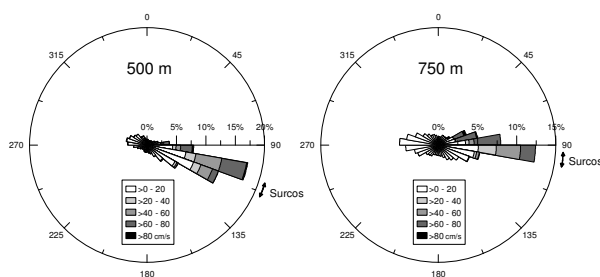


FIGURA 4. Diagramas de frecuencia de dirección e intensidad de la corriente cerca del fondo a 500 y 750 m de profundidad a lo largo del periodo de muestreo. La orientación predominante de los surcos sedimentarios cerca de la posición de los anclajes (indicada al margen de los diagramas) coincide claramente con las velocidades más altas y las direcciones más persistentes de los registros de corrientes. En la Figura 2 se pueden observar las posiciones de los anclajes así como la orientación de los surcos sedimentarios.

Flood (1983) determinó que los valores absolutos de separación de los surcos sedimentarios de tipo 1C podían variar ampliamente, desde 2 a 200 m, aunque en el mismo campo de surcos esta se mantenía relativamente constante. Aunque no existe una clara relación entre los procesos hidrodinámicos y la separación de los surcos que estos generan, sí que se acepta que esta separación es aproximadamente el doble del espesor de la capa límite de fondo (Hollister *et al.*, 1976). Medidas hidrográficas realizadas en el interior del cañón submarino de Cap de Creus durante la catarata del invierno de 2005 determinaron que el espesor de la pluma de agua densa era de unos 60 m (Canals *et al.*, 2006). Así pues, el espaciado de los surcos sedimentarios satisface el criterio hidrodinámico mencionado anteriormente, aportando una nueva evidencia que las cataratas submarinas son responsables de la formación y mantenimiento de estos surcos.

El campo de surcos sedimentarios se puede reseguir en las sonografías de alta resolución desde la cabecera del cañón, a lo largo su eje, hasta una profundidad de 1500 m (Lastras *et al.*, 2007), indicando un acanalamiento de las cataratas submarinas a través del cañón. El hecho que los surcos sedimentarios desaparezcan a esa profundidad responde al rápido

ensanchamiento de las paredes del cañón (Fig. 1), lo que presumiblemente provoca el desconfinamiento y la reducción de la velocidad de la corriente, y la consiguiente pérdida de la capacidad de transporte y erosión de las cataratas submarinas.

El análisis conjunto de las medidas de transporte de sedimento y de la morfología del lecho marino ha proporcionado una visión integrada de cómo las cascadas submarinas son las responsables de la formación y mantenimiento de un gran campo de surcos sedimentarios erosivos en el interior del cañón de Cap de Creus. En la actualidad este proceso es activo, aunque intermitente, y tiene lugar durante episodios intensos de formación de agua densa en el Golfo de León como el ocurrido en invierno de 2005.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la *Office of Naval Research* (proyectos N00014-04-1-0379 y N00014-03-1-142) y por el 5º Programa Marco de la Unión Europea (proyecto EVK3-CT-2002-00079).

## REFERENCIAS

- Canals, M., Puig, P., Durrieu de Madron, X., Heussner, S., Palanques, A. y Fabres, J. (2006): Flushing submarine canyons. *Nature*, 444: 354-357.
- Durrieu de Madron, X., Zervakis, V., Theocharis, A. y Georgopoulos, D. (2005): Comments on "Cascades of dense water around the world ocean". *Progress in Oceanography*, 64: 83-90.
- Flood, R.D. (1983): Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 630-639.
- Heussner, S., Durrieu de Madron, X., Calafat, A., Canals, M., Carbonne, J., Delsaut, N. y Saragoni, G. (2006): Spatial and temporal variability of downward particle fluxes on a continental slope: Lessons from an 8-yr experiment in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Marine Geology*, 234: 63-92.
- Hollister, C.D., Southard, J.B., Flood, R.D. y Lonsdale, P. (1976): Flow phenomena in the benthic boundary layer and bed forms beneath deep-current system. En: *The Benthic Boundary Layer* (I.N. McCave, ed.), Plenum Press, New York, 183-204.
- Lastras, G., Canals, M., Urgeles, R., Amblas, D., Ivanov, M., Droz, L., Dennielou, B., Fabrès, J., Schoolmeester, T., Akhmetzhanov, A., Orange, D.L. y García-García, A. (2007): A walk down the Cap de Creus canyon, northwestern Mediterranean Sea: Recent processes inferred from morphology and sediment bedforms. *Marine Geology*, 246: 176-192.
- Palanques, A., Durrieu de Madron, X., Puig, P., Fabrès, J., Guillén, J., Calafat, A., Canals, M., Heussner, S. y Bonnin, J. (2006): Suspended sediment fluxes and transport processes in the Gulf of Lions submarine canyons. The role of storms and dense water cascading. *Marine Geology*, 234: 43-61.